

УДК 621.771.01

О.П. Максименко, д.т.н, проф., Р.Я. Романюк, аспирант  
Днепропетровский государственный технический университет

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ С ОТСТАВНИЕМ МЕТАЛЛА В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ

*Контактно-гідродинамічний режим тертя характеризується важконавантаженим контактом та тонкоплівочним змащенням. В цьому випадку є можливим процес прокатки при однозонному ковзанні в осередку деформації. Оцінити можливість даного процесу деформації з позиції існуючої теорії є неможливим.*

*В статті, на основі визначення середньої результуючої горизонтальних зовнішніх сил, розроблена методика сталості процесу прокатки при однозонному ковзанні в осередку деформації. Індикатором сталості процесу в цьому режимі є середня результуюча горизонтальних контактних сил.*

*При прокатці з відставанням металу від швидкості валків знижується сила деформації, а, отже, і енергосилові затрати на ведення процесу.*

*The contact-hydrodynamic regime of a friction is characterized by hard loaded contact and thin-film greasing. In this case rolling process is possible at an one-zonal slip in the strain nucleation site for. To size up possibility of the given process of a strain from a position of the existing theory it is impossible.*

*In paper, on the basis of definition of an average resultant of horizontal forces, the technique of stability of process of rolling is developed at an one-zonal slip in the strain nucleation site for. The indicator of stability of process in this regime is the average resultant of horizontal superposed forces.*

*At rolling with backward creep of metal from speed of rolls force of a strain, and, hence, and power inputs on process support decreases.*

Одним из спорных положений теории является вопрос о возможности протекания устойчивого процесса прокатки при отставании металла по всей длине очага деформации.

По мнению ряда учёных, например А. Я. Хейна, данный процесс является невозможным. Вместе с тем, в литературе описаны экспериментальные исследования, в которых зафиксированы случаи устойчивой прокатки при однозонном скольжении металла в очаге деформации. Такие результаты получены в опытах А. Помпа и Г. Веддиге [1], И. М. Павлова и В. К. Белосевича [2], Т. Мидзуно [3], В. А. Николаева [4] и др. Эти результаты имели место при холодной прокатке образцов с вязкими (эффективными) технологическими смазками в условиях контактно-гидродинамического или близкого к нему режима трения. Такой режим трения может наблюдаться и на промышленных станах, например, при прокатке жести с пальмовым (хлопковым) маслом и в других случаях деформации особо тонких полос.

Целью настоящей работы является теоретическое исследование устойчивости процесса прокатки при однозонном очаге деформации.

При выполнении работы использовали методику оценки продольной устойчивости процесса, изложенную в [5, 6]. В основе её лежит определение средней результирующей горизонтальных контактных сил  $Q_{cp}^*$  в очаге деформации.

Как показано в этих работах, при положительном значении этой силы, направленной в соответствие с движением полосы, прокатка протекает устойчиво. При нулевом её значении процесс ведётся в предельных условиях и если  $Q_{cp}^* < 0$ , то он невозможен.

Данная сила является как бы индикатором устойчивости процесса деформации. При теоретической оценке возможности прокатки с отставанием металла в очаге деформации воспользовались моделью в виде дифференциального уравнения Т. Кармана и законом Ньютона контактно-гидродинамического трения:

$$t_x = \eta \frac{dV}{dy} \approx \eta \frac{V_\theta - V_x}{\xi_x}, \quad (1)$$

где  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости смазки;

$V_\theta$  и  $V_x$  – линейная скорость валка и скорость полосы в текущем сечении очага деформации;

$\xi_x$  – текущая толщины слоя смазки с учётом упругих деформаций валка и полосы в предпочаговой зоне.

При прокатке наклепанных и других труднодеформируемых сплавов динамическая вязкость смазки существенно зависит от давления и возможен её переход в твёрдое фазовое состояние. В таких условиях закон Барруса не отражает реального изменения реологии смазки под воздействием нагрузки. Поэтому, в настоящем исследовании, вязкость смазки выразили через другие известные в обработке давлением параметры. При этом предполагали, что среднее значение удельной силы трения при ньютоновской и кулоновской моделях трения одинаковы. Тогда:

$$\eta_{cp} \frac{V_{скр}}{\xi_{cp}} = f_{cp} P_{cp}, \quad (2)$$

или

$$\eta_{cp} = \frac{f_{cp} p_{cp} \xi_{cp}}{v_{скр}}, \quad (3)$$

Подставив в закон Ньютона усреднённое значение динамической вязкости, имеем:

$$\frac{t_x}{\beta \sigma_T} = \frac{f_{cp} p_{cp} \xi_{cp}}{v_{скр} \beta \sigma_T} \frac{v_6 - v_x}{\xi_x}, \quad (4)$$

Учитывая, что:

$$V_x = V_1 \frac{h_x}{h_1}; \quad S = \frac{V_1}{V_6} - 1; \quad V_{скр} = V_6 \frac{\Delta h}{3h_1}; \quad \frac{\xi_{cp}}{\xi_x} \approx 1,$$

а также обозначая:

$$\frac{f_{cp} p_{cp}}{\beta \sigma_T} \frac{3h_1}{\Delta h} = A,$$

окончательно получаем:

$$\frac{t_x}{\beta \sigma_T} = A \left[ 1 - (1 - S) \frac{h_x}{h_1} \right], \quad (5)$$

где  $v_{скр}$  – средняя скорость скольжения металла в валках;

$\xi_{cp}$  – средняя толщина смазочной пленки;

$f_{cp}$  – среднее значение коэффициента трения;

$p_{cp}$  – среднее давление в очаге деформации;

$S$  – опережение;

$\Delta h$  – абсолютное обжатие;

$h_1$  – конечная толщина полосы;

$\beta \sigma_T$  – вынужденный предел текучести деформируемой полосы.

Подставив значение (5) в дифференциальное уравнение Кармана и решив его с учётом граничного условия на входе металла в валки ( $h_x = h_0$ ,  $p_x = \beta \sigma_T$ ), имеем:

$$\begin{aligned} \frac{p_x}{\beta \sigma_T} = 1 + \ln \frac{h_x}{h_0} - A \sqrt{\frac{R}{h_1}} \left\{ (1 - S) \left[ \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{h_x - h_1}{h_1}} - \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} \right] - \right. \\ \left. - (1 + S) \left[ \frac{\sqrt{(h_x - h_1)h_1}}{h_x} - \frac{\sqrt{\Delta h \cdot h_1}}{h_0} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

С учётом граничного условия на выходе из очага деформации ( $h_x = h_1$ ,  $p_x = \beta \sigma_T$ ) из уравнения (6) получаем выражение для определения опережения при холодной прокатке с эффективными технологическими смазками:

$$S = \frac{\operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} - \frac{\sqrt{\Delta h \cdot h_1}}{h_0} - \frac{1}{A} \sqrt{\frac{h_1}{R}} \ln \frac{h_0}{h_1}}{\operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} + \frac{\sqrt{\Delta h \cdot h_1}}{h_0}}. \quad (7)$$

Задаваясь значением опережения, обратным пересчётом по уравнению (7) можно найти параметр  $A$ . Этот параметр определяет геометрические и силовые условия в очаге деформации, при которых процесс прокатки совершается с заданным опережением.

Проанализируем распределение контактных напряжений при следующих параметрах прокатки: радиус валков  $R = 100$  мм, конечная толщина полосы  $h_1 = 0,64$  мм, угол захвата  $\alpha_y = 0,06$  рад и разном опережении.

Результаты исследования распределения контактных напряжений представлены графиками на рис. 1, а, б.

Обратим внимание на то, что ни в одном из сечений очага деформации при нулевом опережении давление

$\frac{p_x}{\beta \sigma_T}$  не меньше единицы (рис. 1, а). Как известно, при  $S = 0$  и кулоновской модели трения давление практически по всей длине очага деформации гораздо меньше вынужденного предела текучести. На наш взгляд с энергетической точки зрения распределение нормального давления при ньютоновской модели трения является более реальным, так как с учётом потерь на трение среднее давление в контакте валков и полосы должно быть больше вынужденного предела текучести. Удельные силы трения во входном сечении очага деформации принимают максимальное значение, а выходном – равны нулю (рис. 1, б).

Кроме того, следует отметить, что при прокатке с нулевым опережением и гидродинамической моделью трения в очаге деформации отсутствуют продольные нормальные растягивающие напряжения. В случае прокатки с

полным отставанием металла от валков ( $S = -2\%$ ) в области выхода из очага деформации эти напряжения появляются.

Ввиду того, что продольная устойчивость процесса прокатки определяется горизонтальными контактными силами, по эпюрам контактных напряжений были найдены в каждом сечении напряжения  $\frac{q_x}{\beta\sigma_T}$ :

$$\frac{q_x}{\beta\sigma_T} = -\frac{P_x}{\beta\sigma_T} \sin \varphi + \frac{t_x}{\beta\sigma_T} \cos \varphi. \quad (8)$$

Распределение продольных контактных напряжений показано на рис. 1, а. Как видно, напряжения  $\frac{q_x}{\beta\sigma_T}$  в начальной части контактной зоны положительны, в средней части очага деформации переходят через нулевое значение и ближе к выходу принимают отрицательное значение. Далее с использованием напряжений  $\frac{q_x}{\beta\sigma_T}$  получено распределение текущей горизонтальной контактной силы  $Q_x^*$  в безразмерной форме (рис. 1, д):

$$Q_x^* = \int_{\phi}^{\alpha} \frac{q_x}{\beta\sigma_T} d\phi. \quad (9)$$

Как следует из приведенного графика, при положительном и нулевом опережении текущая сила  $Q_x^*$  принимает положительные значения по всей длине очага деформации. Ее средние значения, определяемые по формуле:

$$Q_{cp}^* = \frac{1}{\alpha} \int_0^{\alpha} Q_x^* d\phi. \quad (10)$$

также положительны и направлены в сторону движения полосы. В соответствии с [5,6] такой процесс является устойчивым, и прокатка будет осуществляться без частичных пробуксовок.

При "отрицательном" опережении сила  $Q_x^*$  на большей части зоны контакта является также положительной и только вблизи выхода металла из валков она меняет своё направление. Поэтому и при опережении  $S = -2\%$  процесс прокатки будет протекать устойчиво. Этот факт подтверждается экспериментально.

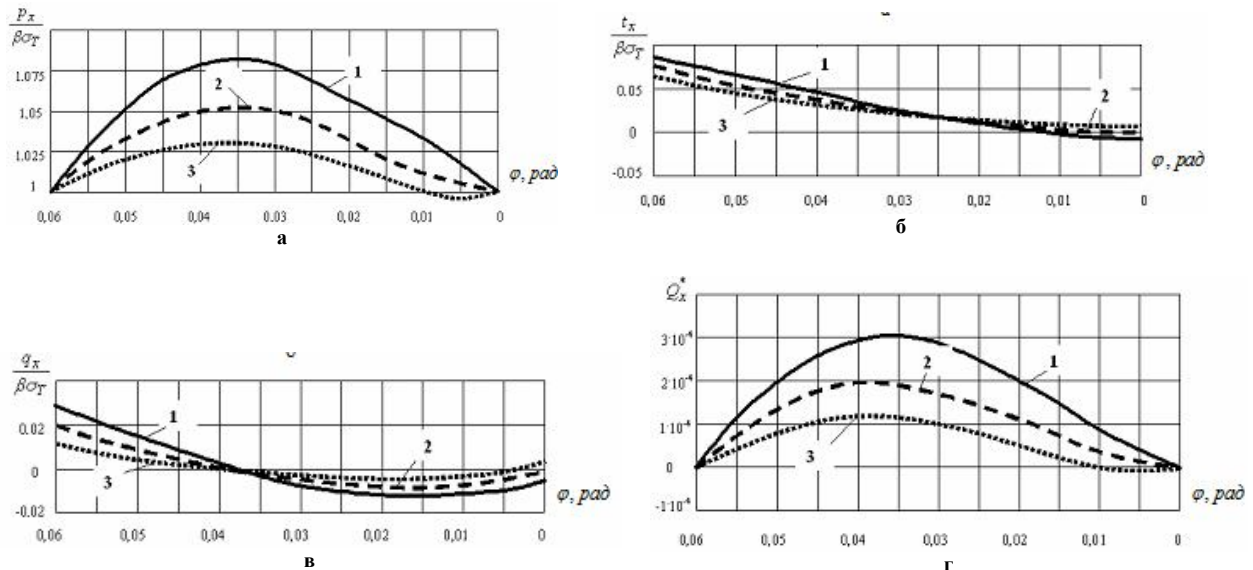


Рис. 1. Эпюры изменения контактных напряжений (а, б), результирующего продольного напряжения (в) и текущей результирующей горизонтальных контактных сил (г) по длине очага деформации

Таким образом, в режиме контактно-гидродинамического трения возможен устойчивый процесс прокатки, как при положительном, нулевом, так и отрицательном опережении.

Заметим, что если при опережении  $S = -2\%$  прокатка ещё является устойчивой, то возникает вопрос, при каком отставании на выходе металла из валков наступят предельные условия прокатки, т.е. в какой момент сила  $Q_{cp}^*$  примет нулевое значение.

Используя вышеприведенную методику, проведены расчёты зависимости средней результирующей горизонтальных контактных сил от опережения. Результаты вычислений приведены на рис. 2.

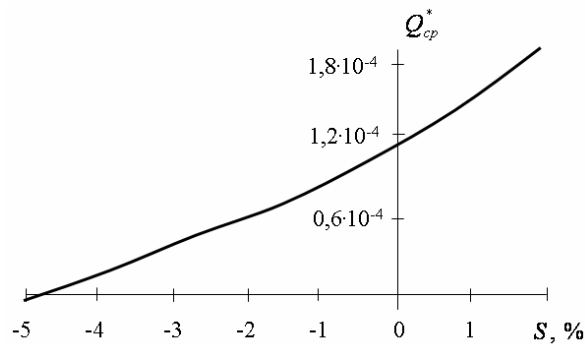


Рис. 2. Зависимость средней результирующей горизонтальных контактных сил от величины опережения

Как следует из данного графика, с уменьшением опережения снижается величина средней результирующей горизонтальных контактных сил. При опережении  $S = -4,7\%$  наступают предельные условия прокатки, т.к., в этом случае,  $Q_{cp}^* = 0$ . При дальнейшем снижении величины  $S$ , сила  $Q_{cp}^* < 0$ , следовательно, устойчивый процесс невозможен.

Практическая ценность прокатки с однозонным скольжением в очаге деформации заключается в отсутствии подпирющего действия сил трения. Это снижает давление металла на валки (рис. 3), усилие деформации, а, следовательно, и энергетические затраты на ведение процесса.

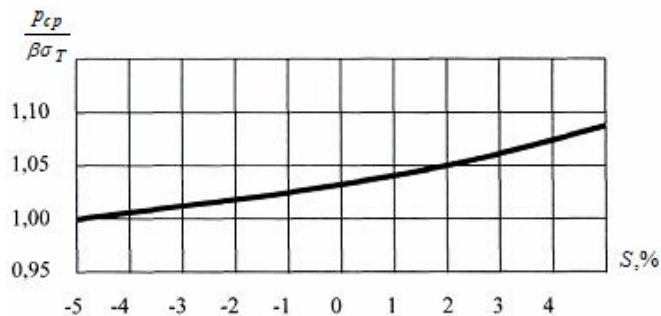


Рис. 3. Зависимость давления металла на валки от величины опережения

### Выводы

Теоретически обоснована продольная устойчивость процесса холодной прокатки с применением технологической смазки при однозонном скольжении металла в валках.

Устойчивость прокатки при полном отставании металла в валках можно обеспечить при контактно-гидродинамическом режиме трения в очаге деформации.

Прокатка с однозонным скольжением является энергетически выгодным процессом, так как в этом случае отсутствует подпирющее действие сил трения.

### Список литературы

1. Помп А. Исследование холодной прокатки стали, плакированной никелем, медью, латунию / А. Помп, Г. Веддиге // Металлург. 1938, № 7-8. – С.144-146.
2. Павлов И. М. К вопросу об отрицательном опережении при прокатке / И. М. Павлов, В. К. Белосевич // Изв. вуз. Чёрная металлургия. 1961, № 10. – С.46-49.
3. Такадзи Мидзуно. Экспериментальное исследование холодной прокатки / Сосей-то како. Том 7. 1966, № 66. – С.363 - 389.
4. Николаев В. А. Технологические параметры прокатки с высоковязкими смазками // Изв. вуз. Чёрная Металлургия, 1995, №4. – с.29-32.
5. Максименко О. П. Теоретический анализ захватывающей способности валков в установившемся режиме прокатки / О. П. Максименко, А. А. Никулин, Р. Я. Романюк // Изв. вуз. Чёрная металлургия. 2008, № 10. – С.32-34.
6. Максименко О. П. Исследование средней результирующей горизонтальных сил в очаге деформации при прокатке. / О. П. Максименко, Р. Я. Романюк // Изв. вуз. Чёрная металлургия. 2009, № 10. – С.22-24.